

クライオ光陰極高周波電子銃用試験空洞の高周波特性 CHARACTERISTICS OF TEST CAVITY FOR CRYOGENIC PHOTOCATHODE RF-GUN

境武志^{#, A)}, 田中俊成^{A)}, 中尾圭佐^{A)}, 野上杏子^{A)}, 稲垣学^{A)}, 高塚健人^{B)}, 長島涼子^{B)}, 高富俊和^{C)},
福田将史^{C)}, 浦川順治^{C)}, 吉田光宏^{C)}, 新富孝和^{D)}, 早川建^{A)}, 早川恭史^{A)}
Takeshi Sakai^{#, A)}, Toshinari Tanaka^{A)}, Keisuke Nakao^{A)}, Kyoko Nogami^{A)}, Manabu Inagaki^{A)}, Kento Takatuka^{B)},
Ryoko Nagashima^{B)}, Toshikazu Takatomi^{C)}, Masashi Fukuda^{C)}, Junji Urakawa^{C)}, Mitsyhiro Yoshida^{C)},
Takakazu Shintomi^{D)}, Ken Hayakawa^{A)}, Yasushi Hayakawa^{A)}

^{A)} Laboratory for Electron Beam Research Application (LEBRA), Nihon University

^{B)} College of Science and Technology (CST), Nihon University

^{C)} High Energy Accelerator Research Organization, KEK

^{D)} Advanced Research Institute for the Sciences and Humanities (ARISH), Nihon University

Abstract

The cryogenic C-band photocathode RF-gun operating at 20 K is under development at LEBRA in Nihon University. The RF-gun is of the BNL-type 2.6-cell pillbox cavity with the resonant frequency of 5712 MHz. The 6N8 high purity OFC copper (corresponding to RRR-3000) is used as the cavity material. From the theoretical evaluation of the anomalous skin effect, the quality factor Q of the cavity at the operating temperature of 20K has been expected to be approximately 60000. Considering a low cooling capacity of the cryogenic system, initial operation of the RF gun is assumed at a duty factor of 0.01%. The cavity basic design and the beam bunching simulation were carried out using Poisson Superfish and General Particle Tracer (GPT). Machining and diffusion bonding of the cavity was carried out in KEK. The Q_0 value of the π -mode resonance at the room temperature (23.5 °C) deduced from the Smith chart was approximately 11440 after diffusion bonding.

1. はじめに

日本大学では、文部科学省 平成 25 年度「光・量子融合連携研究開発プログラム」の「光・量子ビーム技術の融合・連携促進のための基盤技術開発」の支援を受け、20 K 程度まで冷却した高純度の銅による低損失常伝導高周波空洞を用いた高周波電子銃の開発を行っている。空洞内での熱損失を抑制することにより、高効率で大電力加速電場を発生し利用可能な光陰極高周波電子銃を目指している。本研究開発では、高周波源の入手性、試験空洞の設計の容易さから C バンド (5712 MHz) 動作の空洞製作を行っている。キャビティー構造としては 2.6 セルの π モード空洞について検討を行っている。Superfish によるシミュレーションからキャビティー形状の最適化を行い、これに基づいて高純度銅冷却時の高周波特性を検討した。ビーム加速シミュレーションは GPT を用いて行った。20 K における温度特性、低電力高周波特性測定を行うための試作空洞の製作、空洞の拡散接合は KEK で行い、低電力試験は日大と KEK で行った。低電力試験の結果、キャビティー加工後の初期の測定結果から、 Q 値はほぼ設計通りに、共振周波数はチューナー構造なしで予定周波数に近い精度で得られ、ビーズプル法による電界分布測定結果では、ほぼ計算通りの電界が得られていることを確認した。本論文では、シミュレーション及び室

温における低電力高周波測定結果に関して報告する。

2. 高純度銅の低温特性

線膨張率から求めた温度 20 K 基準での高伝導度無酸素銅 (OFHC 銅 (UNS C10100/C10200)) での寸法増加率の値をアメリカ国立標準技術研究所 NIST データベース (温度範囲 4~300 K) の計算式を使い求めた^[1]。これより、20 K 時と比較して、室温 25 °C における寸法の増加は 0.3343% である。また、20 K 付近での線膨張係数は、室温時の 1/100 程

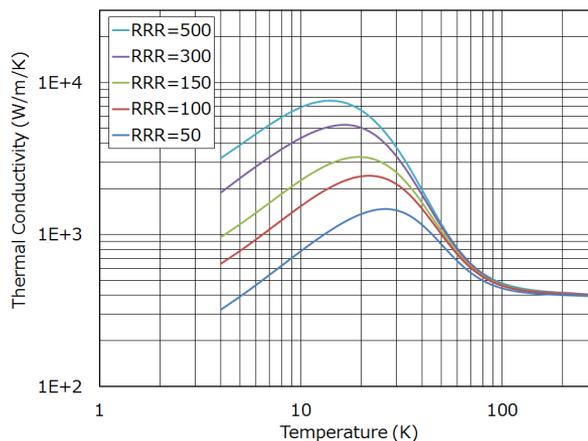


Figure 1: Thermal conductivity for copper of different residual resistivity ratio.

度であるため、温度変化に関して非常に鈍感である

[#] sakai@lebra.nihon-u.ac.jp

といえる。次に、高純度銅の純度の指標として用いられる残留抵抗比 (Residual Resistivity Ratio : RRR) の異なる銅に対する熱伝導度の温度変化を線膨張率と同様に NIST データベースから求めた。温度と熱伝導度の関係を RRR-50~500 の銅材に関して Figure 1 に示す。Figure 1 より RRR = 500 以上の高純度の銅を用いることで、20 K 付近での熱伝導率は常温に比べ 10 倍程度大きくなるのがわかる。20 K での線膨張係数、熱伝導率より、空洞の不均一な温度変化、形状変化に関して抑制が期待される。

3. 冷却時の空洞特性

高周波空洞の表面抵抗 R は、入力高周波電力の壁損失及び空洞の Q 値を決める重要なパラメーターであり、室温領域では通常の表皮効果が支配的である。しかし低温領域では、表皮の厚さに比べて平均自由行程が極端に長くなり、異常表皮効果が生じる。高周波に関して、常温での表面抵抗の式をそのまま適用できず、表面抵抗はかなり大きくなるため、20K で動作させる銅製の高周波空洞の特性は、異常表皮効果を取り入れた解析が必要となる。異常表皮効果の理論的解析は Reuter らによってなされており^[2]、高純度銅材 RRR-3000 の場合、共振周波数 5712 MHz の空洞における表面抵抗の温度依存性を求めると Figure 2 のようになる。これより、異常表皮効果の理論に従い表面抵抗値から換算すると、298 K 時に Q 値 10000 の空洞を 20 K まで冷却すると 54000 程度に上がることが期待できる。

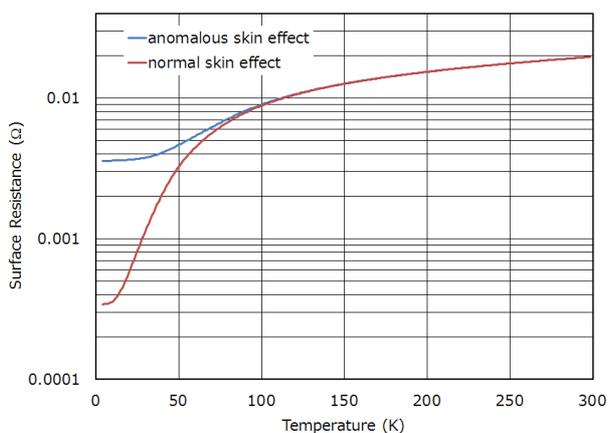


Figure 2: Temperature dependence of the theoretical surface resistance of RRR = 3000 copper cavity at 5712 MHz.

4. 2.6 セル RF 電子銃の仕様

上で述べたように、高周波空洞を 20 K まで冷却した場合の線膨張係数、表面抵抗を検討した結果に基づき、動作周波数は、高周波源の入手性、試験空洞設計、製作の容易さから C バンド (5712 MHz) を採用し、空洞は BNL 型の π モードピルボックス 2.6 セルとした。また、空洞冷却には 50 W の 20 K

冷凍機を 2 台で行うこととし、空洞発熱が 100 W 以下の条件のもとで、現実的な空洞特性を検討した。この検討をもとにした 20 K 高周波電子銃の仕様を Table 1 に示す。

Table 1: Specifications for the 2.6-cell 20 K Cryo-Cooled Photocathode RF Gun

RF frequency	5712	MHz
Source peak RF power	4	MW
Q_0	60000 @ 20 K 11000 @ 293 K	
Shunt impedance	550 @ 20 K 103 @ 293 K	M Ω /m M Ω /m
Coupling coefficient	20	
Cavity length	68.2	mm
RF pulse duration	2	μ s
RF pulse repetition rate	50	Hz
Maximum field on axis	95	MV/m
Maximum wall loss	0.73	MW
RF duty factor	0.01	%
Maximum beam charge	0.5	nC/bunch
Laser pulse repetition rate	357	MHz
Laser pulse length	10-20	ps
Maximum beam energy	3.5	MeV

この仕様のもとに、テスト空洞の設計を行った。テスト空洞では、空洞の共振周波数変化等の高周波特性を知ることが目的とし、実際に高周波電子銃として動作させるときに必要な光陰極組込み部分や外部から高周波電力を入力する結合器は考えず、基本的な構造の空洞を試作することとした。加工用各寸法を Superfish^[3] でメッシュサイズ 0 の場合に 5712 MHz になるように、メッシュサイズと周波数から外挿して詳細な寸法を決定し、KEK に加工を依頼した。寸法は加工時の室温を 298 K とし、20 K での設計寸法から 298 K の加工寸法へと換算を行い、各寸法 0.1 μ m のオーダーで指定した。Figure 3 に設計空洞の断面図を示す。また Figure 4 に、Figure 3

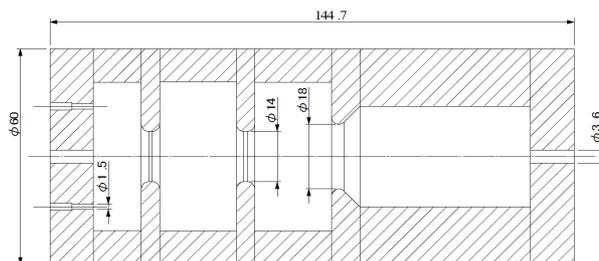


Figure 3: Cross-sectional view of the 2.6 cell test cavity (setup for field measurement).

からアンテナ用の孔と光陰極組込部を省いた加速空洞部分のみの Superfish の計算結果例と加速空洞部分での電界平均を 70 MV/m とした場合の軸上電界分布、Figure 5 に Table 1 の条件のもとで General Particle Tracer (GPT)^[4]を用いて計算したビームトレースの様子を示す。電界分布は、Figure 4 に示した結果を用い、粒子数は 5000、レーザー径を $\phi 1$ mm、電荷量を 0.5 nC/bunch、空間電荷効果を入れて計算を行っている。また、実際の空洞では冷却構造の点から集束系を入れることに難があり、本計算では集束系は考慮していない。

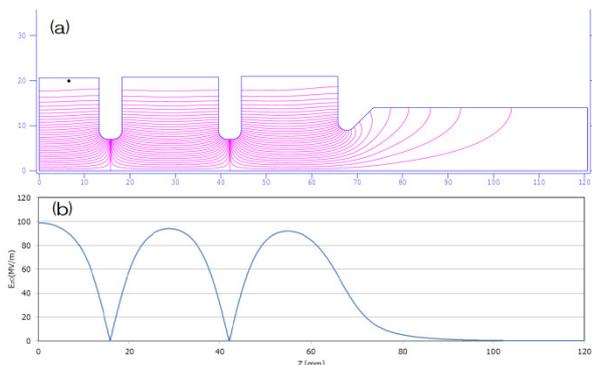


Figure 4: The π -mode electric field by the Superfish simulation. (a) Electric field, (b) On-axis electric field intensity distribution (electric field average : 70 MV/m)

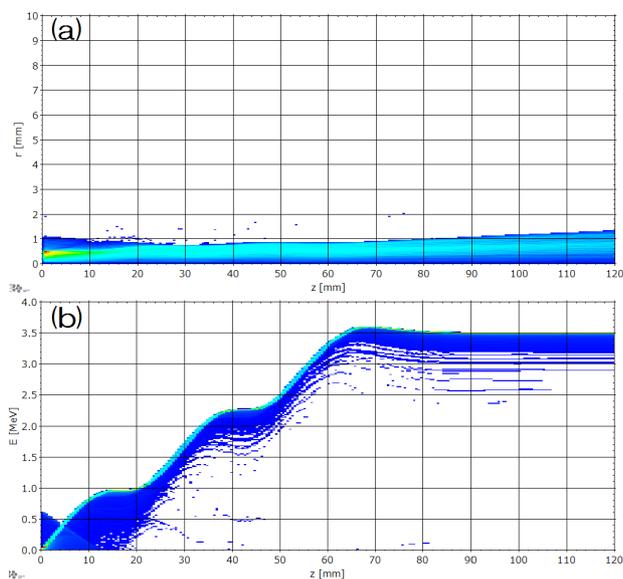


Figure 5: The example of beam simulation by GPT. (a) Beam trajectory, (b) Beam energy.

5. テスト空洞の製作と測定

5.1 テスト空洞製作と拡散接合

空洞の加工において、加工寸法は 298 K (24.85 °C) で指定しており、298 K 時の共振周波数はキャビティーの膨張を考慮すると 5692.970 MHz であるが、実際の加工時の室温は 23.5 °Cであった。

この差は、20 K において 128 kHz 低い共振周波数に仕上がることになる。テスト空洞の各セルを製作後、測定治具で組立て、周波数測定、電界測定を行い、測定完了後、KEK 内で拡散接合を行った。拡散接合には水素炉を用いて、加圧力 0.1 MPa、キャビティー温度 900 °C で 2 時間保持し行った。リークディテクターによる真空漏れ確認後、各寸法の確認を行った結果、曲がり量、外径には大きな変化は見られなかったが、長さが -0.0127 mm 変化した。

5.2 周波数測定、電界測定

各測定はキーサイト・テクノロジー社製のネットワークアナライザー E5071C を用いた。測定時は室温、湿度、大気圧、キャビティー温度を測定し、測定した周波数は Superfish の Convertf の Frequency Conversion を用いて 23.5 °C での真空中の周波数に換算し補正を行った。

テスト空洞の分散関係を Figure 6 に示す。 π モードと $\pi/2$ モードは約 20 MHz 離れており、Superfish による計算とほぼ一致した。

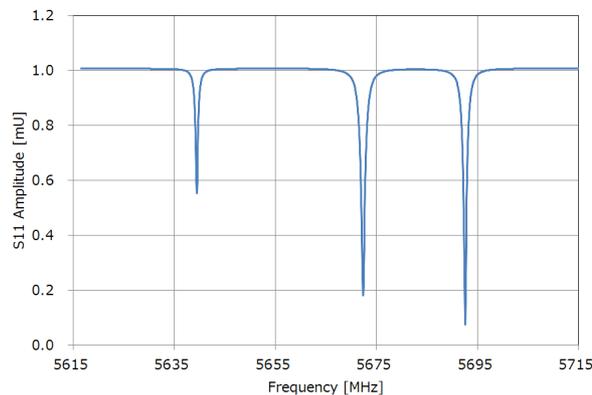


Figure 6: The resonance spectrum and dispersion relation of the 2.6-cell cavity.

拡散接合前の π モードでの共振周波数は 5692.470 MHz (23.5 °C換算) で、 Q_0 はスミスチャートを用いて求めると、約 9015 であった。拡散接合後、再度測定を行い、23.5 °C換算時の π モードの共振周波数は 5692.601 MHz、 Q_0 は約 11440 であり 20%程上昇した。 Q 値はほぼ設計値通りであったが、共振周波数は設計値の 5692.970 MHz に比べ約 370 kHz 低くなっている。キャビティー間ノーズ部の R の寸法が正確に測定できないため、Superfish の計算に反映させ確認することができていないが、ずれている理由として、キャビティーのシリンダー径が設計値に対して 1 μ m 程大きいことなどの理由が考えられる。しかし、チューナー構造無しで 300 kHz 程度の精度で加工されている事が確認できた。

電界測定は拡散接合前に行った。測定はビーズブル法で行い、周波数の変化から電界分布に換算した。また、測定中の温度、湿度、キャビティー温度、気圧による周波数のドリフトの影響を避けるために、ステップ間隔 0.5 mm でキャビティー全体の測定を

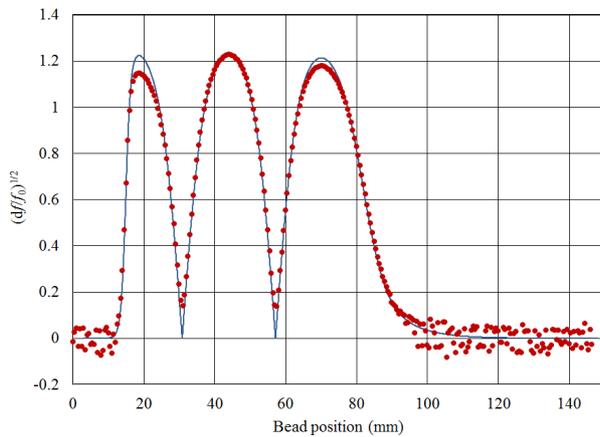


Figure 7: The π -mode electric field distribution of the simulation by Superfish and bead-pull measurement.

高速に 10 回連続で行い、各測定データ補正を行ってから、その平均値を求めた。測定結果を Figure 7 に示す。各点が測定データ、曲線が Superfish の計算結果を示している。Superfish の結果では $r/Q = 376 \Omega$ であったことから、計算による電界分布からビーズのサイズ ($\Phi 2 \text{ mm}$) を基に周波数変化の曲線を導出してある。左端板の 0.6 キャビティーセル部で電界強度が計算値と比較し、約 10% 低下しているが、端板にはアンテナ挿入孔があるため、その影響を受け、若干低下していると考えられる。その他の位置では、計算結果とほぼ一致しており、設計通りの電場分布が得られていると考えられる。

6. まとめ

銅の低温特性、冷却時の空洞特性の検討から、20 K 程度まで冷却した 2.6 セルクライオ光陰極高周波電子銃の仕様を検討し、それに基づき電子銃空洞の基本構造についての検討・空洞の電磁界計算を行い、試作を行った。拡散結合後の室温における測定結果から、チューナー構造が無い状態で、23.5 °C 換算時の予定周波数に近い π モード共振周波数 5692.601 MHz が得られた。また、 Q_0 は 11440 であり、ほぼ設計通りであった。ビーズプル法による電界分布測定でもほぼ計算通りの電界が得られていることを確認した。

今後は拡散接合した空洞を 20 K まで冷却した際の共振周波数の変化の確認、 Q 値の測定、RF 入力結合空洞の検討、試作を行う予定である。

謝辞

本研究開発は、文部科学省 平成 25 年度「光・量子融合連携研究開発プログラム」の「光・量子ビーム技術の融合・連携促進のための基盤技術開発」の支援を受けて行われた。

参考文献

- [1] アメリカ国立標準技術研究所 NIST データベース, http://cryogenics.nist.gov/MPropsMAY/OFHC%20Copper/OFHC_Copper_rev.htm
- [2] G. E. H. Reuter and E. H. Sondheimer: "The Theory of the Anomalous Skin Effect in Metals", Proc. the Royal Society of London A, Mathematical and Physical Sciences, 195, 1042(1948), pp. 336-364
- [3] http://laacg.lanl.gov/laacg/services/download_sf.phtml
- [4] <http://www.pulsar.nl/gpt>